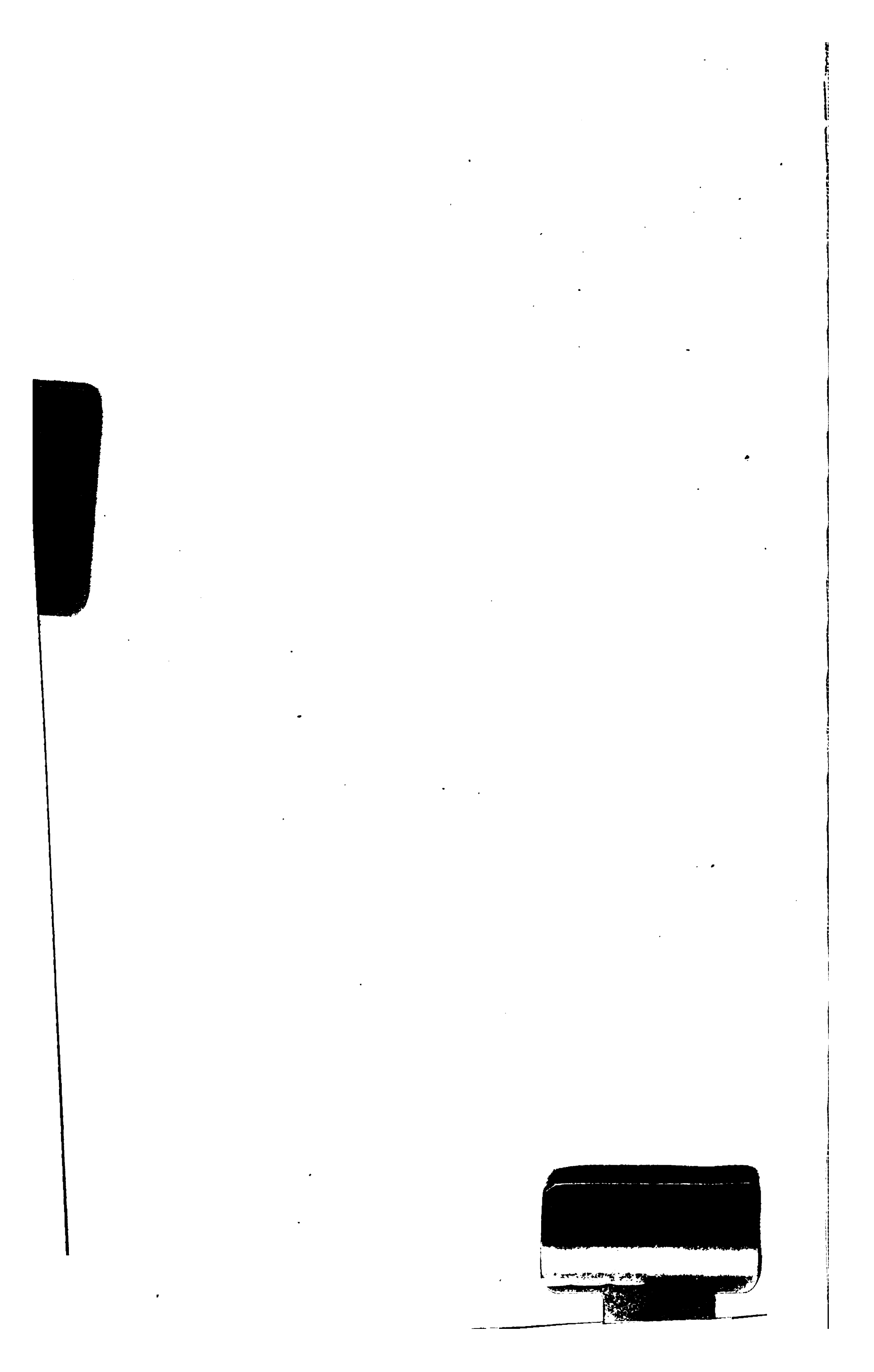


# Beiträge
# zur Lehre von der Umstimmung
# des Sehorgans.

---

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der medizinischen Doktorwürde

vorgelegt der

Hohen medizinischen Fakultät

der

**Albert-Ludwigs-Universität**

zu

**Freiburg im Breisgau**

von

**Karl Bühler** 1879 –

appr. Arzt

aus

**Meckesheim** (Baden).

---

Straßburg

M. DuMont Schauberg

1903.

Gedruckt mit Genehmigung der medizinischen Fakultät der Universität Freiburg i. B.

Dekan:
**Prof. Dr. Kiliani.**

Referent:
**Geh. Hofrat Prof. Dr. von Kries.**

MEINEN ELTERN!

## 1.

## Die Persistenz der optischen Gleichungen.

Die Intensität und Qualität einer Sinnesempfindung hängt einmal ab von der objektiven Beschaffenheit des die Empfindung auslösenden Reizes und zweitens von dem Zustande des perzipierenden Organes. Jede Sinnesempfindung ist also ein Effekt, dessen Größe und Charakter als eine Funktion zweier Variablen — eben des auslösenden Reizes und des Zustandes des perzipierenden Organes — aufgefaßt und bestimmt werden kann. Eine mathematische Präzisierung dieser Funktion ist bis jetzt am besten auf dem Gebiet der Gesichtsempfindungen gelungen. Hier war es vor allem die erste Variable, nämlich die physikalische Beschaffenheit des reizenden Lichts, welche seit lange schon die Physiker und Physiologen beschäftigte. Das Ergebnis ihrer Forschungen ist niedergelegt in den Newtonschen Sätzen von der Lichtmischung, die von Graßmann mathematisch formuliert wurden.

Weit weniger exakt können bis jetzt unsere Kenntnisse von der zweiten Variablen, dem Zustande des Sehorganes und dem Einfluß seiner Änderung auf die Gesichtsempfindungen, ausgedrückt werden. Und doch gehören Teile dieses Gebietes zu den bestuntersuchten der Physiologie. Die hier bekannten Tatsachen zerfallen in zwei Gruppen:

1. Gibt es eine ganze Reihe von Tatsachen, die zu der sehr wahrscheinlichen Annahme führen, daß unser Sehorgan aus zwei verschiedenen bis zu einem gewissen Grade selbständig funktionierenden Apparaten besteht, die mit prägnanten Ausdrücken als der «Hell-» und der «Dunkelapparat» bezeichnet wurden. Es ist klar, daß sowohl die Eigenartigkeit ihrer

Funktion als auch das Verhältnis ihrer Beteiligung am Zustandekommen einer Gesichtsempfindung auf diese von entscheidender Bedeutung sein muß.

2. Ist es bekannt, daß das Auge wie jedes andere Organ durch die Funktion seinen Zustand ändert. Das Wesen dieser Änderung wird von den einen mit Helmholtz analog den Vorgängen bei der Muskel- oder Drüsenfunktion als Abnahme des zersetzbaren Stoffes, von den anderen mit Hering als Änderung des Verhältnisses der Tendenzen zu den antagonistischen Prozessen in den hypothetischen Sehsubstanzen aufgefaßt, und demgemäß werden die darüber bekannten Tatsachen von den einen als Ermüdungs-, von den anderen als Umstimmungserscheinungen bezeichnet.

Ihr Studium führt zu zwei voneinander unabhängigen Problemen:[1]) Einmal kann man sich die Aufgabe stellen, eine irgendwie gegebene Stimmung des Sehorgans zu charakterisieren, also etwa exakt anzugeben, worin sie sich von einer anderen schon bekannten (vielleicht Neutralstimmung) unterscheidet, was mit der Aufgabe zusammenfällt, für jedes Licht die Wirkung auf das Auge von der gegebenen Stimmung dadurch zu charakterisieren, daß man angibt, durch welches andere Licht dieselbe Wirkung im neutral gestimmten Auge hervorgerufen wird. Dann aber kann man auch fragen, welche Stimmung eine gegebene Tätigkeit, etwa die Belichtung mit irgend einem Lichte, während irgend einer Zeit hervorruft.

Zur Lösung des ersteren Problems verwertete v. Kries die überaus übersichtliche Konstruktion der Newtonschen Farbentafel; diese Anwendung setzte aber die Gültigkeit zweier allgemeiner Sätze voraus, die er als den Persistenz- und den Proportionalitätssatz bezeichnet hat.

Der erstere besagt: «Wenn zwei Lichtgemische dem neutral gestimmten Sehorgan gleich erscheinen, so erscheinen sie auch dem irgendwie umgestimmten gleich», also: «optische Gleichungen sind von der Stimmung, in der sie gelten, unab-

---

[1]) Vergl. J. v. Kries, Theoret. Studien über die Umstimmung des Sehorgans (Festschrift der Univ. Freiburg zum 50jähr. Regierungsjubiläum des Großh. v. Baden, S. 145 ff.).

hängig». Er wurde schon im Jahre 1878 von Herrn v. Kries als Konsequenz aus der Joung-Helmholtzschen Theorie abgeleitet und auch experimentell bewiesen.

Erst viel später zeigte es sich, daß der Satz für Empfindungen der Netzhautperipherie bei Adaptationsänderungen des Auges bei Trichromaten nicht strenge, bei Dichromaten nicht einmal annähernd gültig blieb; eine Tatsache, die durch die Annahme der Einmischung des Dunkelapparats ihre befriedigende Erklärung fand. Da wir nun seitdem in dem Helmholtzschen Spektralapparat, besonders bei Einschaltung des Lummerschen Würfels, einen viel vollkommeneren und bequemeren Apparat zur Herstellung von Farbengleichungen erhalten haben, so erschien es wünschenswert, den Persistenzsatz wegen seiner für die Umstimmungserscheinungen grundlegenden Bedeutung systematisch und mit Ausschluß der Bedingungen, die ihn ungültig machen, nachzuuntersuchen. Diese Arbeit habe ich auf Veranlassung des Herrn Geheimrats v. Kries im Sommer 1902 im hiesigen physiologischen Institut durchgeführt.

## Versuche.

### 1. Der Apparat.

Die Versuche wurden mittels des im hiesigen physiologischen Institut aufgestellten neueren Helmholtzschen Farbenmischapparates angestellt.[1]) In bekannter Weise lieferte der eine Kollimator das fixierte unvariable Licht, der andere die Mischung. Um die beiden Felder noch bequemer und sicherer vergleichen zu können, wurde zwischen das Prisma des Apparats und den Okularspalt ein Lummerscher Würfel eingeschaltet, welcher das Licht des ersten Kollimators in den äußeren Ring, das des zweiten Kollimators in den inneren Kreis warf. Indem man nun die Grenzen des Kreises zum Verschwinden zu bringen suchte, was bei einem Teil der Gleichungen vollkommen, bei einem andern nur annähernd gelang, konnte man leicht eine gute Farbengleichung herstellen.

---

[1]) Beschrieben von J. v. Kries in Zeitschr. f. Psych. u. Physiol. der Sinnesorgane, Bd. XII, S. 29.

Als Lichtquellen dienten zunächst die bekannten Triplex-Gasbrenner. Sie haben den Nachteil, daß sie kein konstantes Licht liefern, sondern mit dem Schwanken des Gasdrucks und wohl auch anderer unberechenbarer Faktoren (Luftzug, Erwärmung etc.) in der Flammenhöhe wechseln. Dieser Wechsel erfolgt nie ganz gleichmäßig in beiden Brennern und bedingt deshalb Störungen in der Gleichung. Die ständige Regulierung der Flammenhöhe an den Gashähnen ist lästig und nicht ausreichend; eingeschaltete Gasdruckregulatoren brachten auch keine bemerkbare Besserung, und so wurden schließlich die Triplexbrenner ganz beiseite gelassen und durch Auerbrenner ersetzt, die eine deutliche Verbesserung darstellen, aber auch noch kein ganz konstantes Licht liefern. Die allmählich durch die Abnützung des Glühstrumpfes eintretende Änderung des Auerlichts störte die Versuche, welche ja nur eine Konstanz während der einzelnen Versuchsreihe verlangten, nicht.

Im Kollimator II wurde dann, da das von ihm beleuchtete Feld Flecken zeigte, die offenbar von einer reellen Abbildung des Glühstrumpfes herrührten, ein Glasplättchen vor dem Spalte eingeschoben.

Zu Beginn der ganzen Arbeit wurden die Konstanten des Apparats bestimmt. Nach Königs Vorgang wurden dann Tabellen für die den einzelnen Kollimatorteilstrichen beider Kollimatoren entsprechenden Wellenlängen aufgestellt, die sich mit den von Herrn Geheimrat v. Kries in den Jahren 1896 und 1897 aufgestellten fast genau deckten. Vor jeder Versuchsreihe wurde außerdem durch Bestimmung der Natriumlinie (später der gelben Heliumlinie mittels der von Tschermak angegebenen Heliumröhre)[1]) der Apparat von neuem kontrolliert.

### 2. Versuchsanordnung.

Die Aufgabe erforderte die Möglichkeit eines genauen Vergleichs zwischen Gleichungen, die mit neutral gestimmtem, und Gleichungen, die mit «umgestimmtem» Sehorgan eingestellt waren. Ein Unterschied in beiden konnte sowohl den Farbenton,

---

[1]) Pflügers Archiv, Bd. 88.

als die Helligkeit, als beide zusammen betreffen; die Untersuchung mußte also nach beiden Richtungen getrennt vorgehen. Diese Überlegung führte zu folgender, als der zweckmäßigsten Versuchsanordnung: Um eine Gleichung zwischen einem homogenen Licht, resp. einer Mischung aus zwei homogenen Lichtern einerseits und der Mischung zweier anderer homogener Lichter andererseits herstellen zu können, mußte natürlich zunächst die bestimmte Wellenlänge und eine passende Helligkeit des Vergleichslichts, sowie die Wellenlängen der Mischungskomponenten mit Hilfe der aufgestellten Tabellen am Apparat richtig eingestellt werden. War dann eine Gleichung möglichst genau hergestellt, so blieben die eben genannten Größen für die ganze Versuchsreihe unverändert, von den beiden noch übrigen Variablen aber — nämlich Farbenton (d. h. Mischungsverhältnis der beiden Komponenten) und Helligkeit des gleichzumachenden Lichtes — blieb abwechselnd die eine unverändert, während die andere mit jeder Einstellung neu gesucht wurde. Jede von ihnen wurde nun getrennt 3mal mit neutral gestimmtem, dann 3mal mit umgestimmtem und wieder 3mal mit neutral gestimmtem Auge eingestellt und dieses Versuchsschema 5mal nacheinander wiederholt (wobei die der neutralen Stimmung entsprechenden Glieder der Reihe zwischen den umgestimmten natürlich nicht doppelt vorhanden zu sein brauchten).

Eine Versuchsreihe besteht also aus 33 Einstellungen des gesuchten Farbentons oder der gesuchten Helligkeit des gleichzumachenden Lichts einer bestimmt gegebenen Gleichung. Davon sind die 15 Einstellungen mit dem in bestimmter Weise umgestimmten Sehorgan zu je dreien zeitlich in die Einstellungen mit neutralem Sehorgan eingeschlossen. Die Begründung dieser Anordnung ergibt sich aus der Aufgabe von selbst.

Als neutral gestimmt ist dabei ein Auge bezeichnet, das längere Zeit (über 10 Min.), ohne zu fixieren, im tageshellen Zimmer umher- oder an die hellen Wolken des Himmels gesehen hatte, und daher, wenn es geschlossen wurde, weder positive noch negative Nachbilder auftauchen ließ. Umgestimmt wurde das Auge durch Fixation eines Quadrats aus farbigem Papier auf einem komplementär gefärbten Grunde, das vom

vollen Tageslicht getroffen in einer Entfernung von 1,4 m vom Auge aufgestellt war. Die wirkliche Größe der Quadratseite betrug 13 cm, die scheinbare 5° 20′. Die Fixation wurde 40″ lang fortgesetzt und danach sofort die Einstellung gemacht; sie wurde alsbald abgelesen, dann sofort wieder 40″ fixiert und eingestellt und ebenso zum drittenmal. Daß die Umstimmung einen hohen Grad erreicht hatte, konnte man immer an der Lebhaftigkeit des Nachbildes erkennen, das bei der Einstellung das ganze Farbenfeld überdeckte und umschloß. Da die 2. und 3. Umstimmung der 1. jeweils sehr schnell folgten (es lag ja nur die Zeit der Einstellung 3—5″, und der Ablesung ca. 5″, also insgesamt nicht mehr als 10″ dazwischen), so mußten sich die Effekte der Einzelumstimmungen summieren und es hätte ein etwaiges Ungleichwerden der Gleichungen bei noch höheren Graden der Umstimmung auf diese Weise sich der Beobachtung nicht entziehen können. Übrigens wurde in den letzten Gliedern der 5 letzten Versuchsreihen die Zeit der 2. und 3. Umstimmung auf 30″ beschränkt, was sich als vollkommen genügend erwies.

Auf 2 Punkte wurde bei den Versuchen eine besondere Aufmerksamkeit verwendet:

1. Das Auge sollte soweit als möglich während der ganzen Versuchsreihe gleichmäßig in gut hell adaptiertem Zustande erhalten werden. Deshalb wurden die Versuche in einem Zimmer angestellt, zu dem das Tageslicht durch zwei große Fenster freien Zutritt hatte, und außerdem betrachtete das neutral gestimmte Auge häufig die weißen Wolken.

2. Die Feldgröße der Gleichung wurde so gewählt, daß das Bild eine scheinbare Größe von 2° erhielt. Bei den Einstellungen wurde dann immer das Zentrum des Feldes gut fixiert und so lag seine Abbildung stets in einem Bezirk der Netzhaut, der, wenn auch nicht ganz, so doch nahezu als stäbchenfrei angesehen werden muß.[1]) Beide Vorsichtsmaßregeln

---

[1]) Vergl. v. Kries und Nagel, Weitere Mitteilungen über die Sonderstellung des Netzhautzentrums (Zeitschr. f. Psych. u. Physiol. der Sinnesorgane, Bd. 23, S. 161).

waren geboten, um mit voller Sicherheit eine Einmischung des «Stäbchenapparates» ausschließen zu können.

### 3. Die untersuchten Gleichungen.

Den Versuchen wurden 3 Gleichungen zugrunde gelegt:

I. Eine Gelbgleichung von der Form:

$$a)\ \lambda_{670,8} + b)\ \lambda_{533,9} = c)\ \lambda_{589,3}.$$

Also ein Gemisch aus zwei Lichtern von der Wellenlänge der roten Lithiumlinie (670,8 μμ) und der Thaliumlinie (533,9 μμ) wurde gleichgemacht einer bestimmten Menge homogenen Lichtes von der Wellenlänge der Natriumlinie (589,3 μμ).

II. Eine Grünblaugleichung von der analogen Form:

$$a)\ \lambda_{520} + b)\ \lambda_{460} = c)\ \lambda_{485}\ (+\ d)\ \lambda_{665}).$$

Dem Vergleichslicht von der Wellenlänge 485 μμ wurde hier eine geringe Menge komplementäres Licht von der Wellenlänge 665 μμ zugesetzt, um die Sättigungsdifferenz auszugleichen, die zwischen beiden Seiten der Gleichung bestand.

III. Eine Weißgleichung aus 4 Komponenten:

$$a)\ \lambda_{670,8} + b)\ \lambda_{500} = c)\ \lambda_{589,3} + d)\ \lambda_{486}.$$

Die Wahl gerade dieser Gleichungen ging aus einem doppelten Bestreben hervor: Einmal sollten von allen denkbaren einfachen Farbengleichungen die Haupttypen vertreten sein, von denen aus man das gewonnene Resultat auf alle übrigen ausdehnen konnte. Die erste Forderung war also die, daß die gewählten Lichter Repräsentanten aus allen Abschnitten des Spektrums darstellen mußten. Ihre speziellere Wahl aber und Gruppierung zu Gleichungen konnte nur unter Leitung unserer theoretischen Vorstellungen vom Wesen der Umstimmungserscheinungen so getroffen werden, daß wir die gewünschte Verallgemeinerung des Resultats, die sich ja ihrerseits wieder ganz auf dieselben Theorien stützt, vornehmen konnten. In dieser Hinsicht stellte die Helmholtzsche Ermüdungsvorstellung an die Untersuchung keine speziellen Anforderungen. Da nämlich aus ihr der Persistenzsatz sich als unmittelbare Konsequenz ergibt,[1]) so könnte sie höchstens die negative

[1]) Vergl. v. Kries, Beitrag zur Physiol. der Gesichtsempfindungen, Du Bois' Archiv, 1878.

Prüfung ihrer Richtigkeit an möglichst vielen, möglichst verschiedenen Gleichungen verlangen. Wohl aber forderte die Heringsche Theorie eine speziellere Versuchsanordnung. Aus ihr (wenigstens in ihrer weiteren Formulierung) folgt nämlich der Persistenzsatz nicht mit logischer Notwendigkeit, vielmehr kann man sich auf ihrem Boden auch Möglichkeiten konstruieren, in denen er ganz ungültig wird.

Diese Möglichkeiten sind gegeben in Farbengleichungen, deren eine Seite aus Lichtern besteht, die hauptsächlich auf die eine der beiden farbigen Sehsubstanzen wirken, während die Komponenten der anderen Seite hauptsächlich auf die andere wirken. Diese Eigenschaft kommt den angegebenen Gleichungen zu und war der zweite Grund zu ihrer Wahl. Die dreifache Variation, in der in ihnen die Erfüllung derselben Bedingung auftritt, bot Gewähr dafür, daß eine tatsächlich vorhandene Abweichung nicht übersehen werden konnte.

#### 4. Die untersuchten Umstimmungen.

Denkt man sich mit Helmholtz das Wesen der Stimmungsänderung des Auges als Verminderung der Erregbarkeit einer oder mehrerer von den drei Komponenten des Sehnervenprozesses, dann genügt es, für eine Gleichung den Einfluß dreier Ermüdungen — die praktisch am besten möglichst jede Komponente einzeln betreffen — zu untersuchen, um auch den Einfluß jeder anderen Ermüdung angeben zu können. Geht man dagegen von der Heringschen Vorstellung aus, so wird man sich neben der neutralen vier andere einfache Stimmungen des Sehorgans denken können, die dadurch charakterisiert sind, daß in einer der beiden Farbensehsubstanzen die Erregbarkeit des einen Prozesses die des anderen überwiegt, während die beiden anderen Sehsubstanzen neutral gestimmt sind. (Eine Änderung der Erregbarkeit des in der Schwarz-Weißsehsubstanz einzig möglichen D-Prozesses könnte nur die Helligkeit der ganzen Gleichung ändern, hätte also auf ihre Gültigkeit keinen Einfluß. Übrigens erheischte eine Untersuchung nach dieser Richtung eine andere Versuchsanordnung.) Um nun gleichzeitig den Ansprüchen beider Theorien gerecht zu werden,

wurden vier Umstimmungen untersucht, und zwar die durch rotes, grünes, gelbes und blaues Licht hervorgebrachten.

### Resultat.

Für jede Umstimmung stellte ich bei jeder Gleichung zwei Versuchsreihen (für Farbenton und Helligkeit), also zusammen $4 \times 3 \times 2 = 24$ Versuchsreihen, an. Um nun den Überblick ihres Resultates zu erleichtern, versuchte ich eine graphische Darstellung desselben. (Vergl. Tafel 1.)

Denke ich mir in einem rechtwinkligen Koordinatensystem die Einstellungswerte (Winkelgrößen oder Spaltweiten) als Ordinaten in einem beliebigen Maßstab und die zeitliche Folge der Einstellungen durch gleiche Abschnitte auf der Abszissenaxe ausgedrückt, so erhalte ich für jede Einstellung einen bestimmten Punkt in dem System. Verbinde ich alle Punkte geradlinig miteinander, so erhalte ich eine Linie, die mich erkennen läßt, in welchem Sinne und um wie viel (in dem angenommenen Maßstab) die Einstellungen voneinander verschieden sind. Berechne und konstruiere ich mir nun aus je drei zusammengehörigen Einstellungen den Mittelwert und verbinde nur die Mittelwerte der Kontrolleinstellungen (= Einstellungen mit neutral gestimmtem Auge) miteinander, so erhalte ich eine Mittelwertslinie der Kontrolleinstellungen, gleichsam eine Normale, nach der ich die Lage der Mittelwerte der Einstellungen mit umgestimmtem Auge beurteilen muß. Ändert sich die Gleichung für das neutrale Auge nicht, dann stellt die Normale eine Parallele zur Abszissenaxe dar. Bleibt sie auch für das umgestimmte Auge gültig, dann fallen die Mittelwerte der Einstellungen mit umgestimmten Auge in die Normale; wird sie aber in einem bestimmten Sinne ungültig, so liegen sie nach einer bestimmten Seite außerhalb der Normalen.

Zur Darstellung wurden direkt die abgelesenen Zahlen benützt. Das bedarf für die Spaltweiten keiner Rechtfertigung, denn sie sind der Lichtmenge (= Helligkeit) direkt proportional, wohl aber für die Winkelwerte der Nicoleinstellungen: der Farbenton einer Mischung wird ja ausgedrückt durch das Mengenverhältnis der beiden Mischungskomponenten. Nun ist

aber das Verhältnis der langwelligen zur kurzwelligen Komponente in unserem Apparat gleich:

$$\frac{s_{\times} \cdot \cos^2\alpha}{s_{\times} \cdot \sin^2\alpha} = \underline{\operatorname{cotg}^2\alpha},$$

wobei $\alpha$ den Stellungswinkel des Nicolschen Prismas, s die Spaltweite bedeutet.

Der Farbenton ändert sich also nicht wie der Winkel, sondern wie das Quadrat der Kotangente des Winkels. Da es sich aber bei unserer Aufgabe um den Vergleich nur sehr kleiner Änderungen handelt (0,05—0,5°) und der absolute Sinn der Änderung zunächst ganz gleichgültig ist, so schien mir die mühsame Umrechnung der Werte nicht indiziert; ich glaubte vielmehr, es genüge, wenn ich den prozentualen Maßstab der Änderungen beigab.

## Mittlerer Fehler.

Eine exakte Formulierung des Resultats verlangt die Angabe der Fehlergrenzen. Es war daher wünschenswert, die mittleren Einstellungsfehler in Prozenten zu berechnen. Diese Berechnung wurde folgendermaßen ausgeführt: Es seien 78,9°, 79,3° und 79,1° drei zusammengehörige Nicoleinstellungen, so ist deren Mittelwert 79,1°. Davon weichen ab:

78,9 um 0,2°,
79,3 » 0,2°,
79,1 » 0°.

Also beträgt die Abweichung im Mittel (= mittlerer Fehler) 0,4° : 3 = 0,13°.

So wurden aus allen Einstellungsgruppen die mittleren Fehler und aus diesen der mittlere Fehler der ganzen Reihe berechnet. Er betrage 0,226°.

Nun liegen die Einstellungen bei 79,1°, d. i. bei 73,5° korrigierten Wertes (der Nullpunkt des Nic. I liegt nämlich bei + 5,6°). Der Farbenton (= Mengenverhältnis von langwelligem zu kurzwelligem Bestandteil) ändert sich aber bei Änderung der Einstellung von 73,4° — 73,5°, von cotg² 73,4° — cotg² 73,5°, oder um x%

$$\frac{\operatorname{cotg}^2 73{,}4^0}{\operatorname{cotg}^2 73{,}5^0} = \frac{100 + x}{100}, \ \underline{x = 1{,}1}$$

Also ändert sich der Farbenton bei Winkeländerung von 0,226° um 1,1×0 : 0,226 = **2,49**%. Somit beträgt der mittlere Fehler der Reihe 2,49%.

Für die Spaltweiteneinstellungen wurde die Rechnung analog durchgeführt. Es sei z. B. der mittlere Fehler einer Reihe 0,52 Teilstriche des Maßstabs der Spaltschraube und die Einstellungen liegen zwischen 34 und 36, dann beträgt die Änderung für einen Teilstrich: 2,95%, also der mittlere Fehler der Reihe: 2,95 : 0,52 = **1,53**%.

Die auf diese Weise berechneten mittleren Fehler betrugen für die Nicoleinstellungen 1,3—7,0%, im Mittel 3,8%. Den kleinsten Fehler zeigte die Gleichung I (Gelbgleichung), den größten die Gleichung II (Blaugrüngleichung). Der Grund des großen Fehlers ist bei ihr wohl zum großen Teil in der Inkonstanz der Lichtquellen zu suchen, denn das Dunklerwerden eines Feldes wird man sehr leicht mit Violetterwerden und das Hellerwerden mit Grünerwerden verwechseln. Für Änderungen des Weiß ist das Auge sehr empfindlich, man sollte daher erwarten, daß die Weißgleichung den geringsten mittleren Einstellungsfehler aufwiese. Wenn dem nicht so ist, so ist der Grund in folgendem zu suchen: Den Winkelgraden nach sind die Einstellungen der Weißgleichung tatsächlich weitaus die genauesten. Ihre mittleren Fehler gehen teilweise bis an die Grenze des Ablesungsfehlers (0,05°) heran und betragen im Mittel 0,15°. Aber der absolute Wert dieser Einstellungen liegt in sehr hohen Winkelgraden (bis zu 76°) und da ändert sich die Tangente schon sehr schnell und noch schneller natürlich das Quadrat der Tangente. Der kleine Fehler, in Winkelgraden ausgedrückt, hat daher einen unverhältnismäßig hohen prozentualen Wert.

Der mittlere Fehler der Helligkeiteinstellungen beträgt 0,7—4%, im Mittel 2,2%. Hier übertrifft die Weißgleichung die beiden anderen an Genauigkeit (1,3%).

### Formulierung des Resultats:

Durch die Versuche ist nun experimentell bewiesen: Die untersuchten Umstimmungen üben auf die unter-

suchten Gleichungen innerhalb der angegebenen Fehlergrenzen keinen Einfluß aus.

Nach den oben gegebenen Erörterungen kann der Satz auf alle Umstimmungen und alle Gleichungen ausgedehnt werden. Zu einer wahrscheinlichen Annahme innerhalb der Fehlergrenzen führt folgende Erwägung:

Denke ich mir eine Gleichung durch eine Umstimmung in einer bestimmten Richtung beeinflußt, so werden die Einstellungen, selbst wenn das Resultat durch die Beobachtungsfehler verdeckt wird, doch die Tendenz haben, in der angenommenen Richtung von den Mittelwerten der Einstellungen mit neutral gestimmtem Auge abzuweichen. In der graphischen Darstellung werden also die Mittelwerte der Einstellungen mit umgestimmtem Auge überwiegend auf derselben Seite außerhalb der Normalen liegen, und vollends wird ihr Schwerpunkt — wenn ich sie mir als schwere starr verbundene Punkte denke — mit großer Wahrscheinlichkeit nach der bestimmten Seite der Normalen fallen. Ein Blick auf die graphische Darstellung zeigt nun, daß diese Annahme nicht zutrifft. (In Tafel 1 bedeuten die ausgezogenen Linien die Normalen, die mit ✶ bezeichneten Punkte die Mittelwerte der Einstellungen mit umgestimmtem Auge.) Die Mittelwerte der Einstellungen mit umgestimmtem Auge liegen ohne erkennbare Regel zu beiden Seiten oder auf der Normalen. Nur zwei Versuchsreihen schienen eine Abweichung von dieser Regel aufzuweisen, nämlich die Reihen I, 1 und II, 3. Es war natürlich geboten, mit besonderer Sorgfalt zu prüfen, ob diese Ausnahmen auf einer Gesetzmäßigkeit beruhten oder nur dem Zufall zuzuschreiben waren. Von den beiden Reihen stellt die erstere die Farbenton- (Nicol-) Einstellungen der Gelbgleichung bei rotumgestimmtem Auge dar. Mit dem umgestimmten Auge stellte ich in ihr durchschnittlich mehr Rot und weniger Grün ein, um eine Gleichung mit dem homogenen Gelb zu erhalten. Die Mischung erfüllte dabei den Ring des Lummerschen Prismas, während das Vergleichslicht im Zentrum lag. Man konnte also daran denken, daß trotz der Tagesbeleuchtung bei Fixation des roten Feldes eine schwache Dunkeladaptation des Auges eingetreten war und

durch sie die weitaus stärkere Wirkung der Grünkomponente der Mischung auf den Dunkelapparat gegenüber der Rotkomponente in der Peripherie des Gleichungsfeldes zur Geltung kam. Die Mischung mußte dadurch an Sättigung verlieren, an Helligkeit gewinnen, und man konnte versucht sein, diese Ungleichheit durch Änderung des Mischungsverhältnisses zugunsten des gesättigteren und dunkleren Rotanteils scheinbar auszugleichen. Diese Annahme setzte freilich die Existenz eines adaptationsfähigen Apparats in einer Netzhautzone voraus, die man nach den bisherigen Angaben für stäbchenfrei und nicht adaptationsfähig halten muß. Sie hat sich auch aus anderen Gründen als unwahrscheinlich erwiesen. Vor allem fand die aus ihr unmittelbar hervorgehende Konsequenz, daß dieselbe Ungleichheit auch bei Einstellungen, welche die Nicolstellung unverändert ließen und nur die Spaltweite variierte, hätte hervortreten und dann durch Herabsetzung der Helligkeit der Mischung hätte ausgeglichen werden müssen, in den Versuchen keine Stütze. (Vergl. die Tabellen 2, 3 und 4.) Auch die naheliegende Prüfung des Einflusses der Dunkeladaptation, ohne Umstimmung auf die Gleichung, fiel in negativem Sinne aus. Dagegen änderten sich, als ich die Mischung ins Zentrum und das homogene Licht in den Ring des Feldes brachte, auch die Einstellungen zugunsten des Grünanteils der Mischung; eine Tatsache, die darauf hinweist, daß die Erklärung der Eigentümlichkeit wohl in lokalen Unterschieden des Verhaltens der Netzhaut gegenüber der Rotumstimmung zu suchen ist. Sie trat übrigens bei den Versuchen des Herrn Dr. Trendelenberg, der die Güte hatte, mir bei der Nachprüfung Kontrolleinstellungen zu machen, nicht mit derselben Regelmäßigkeit auf, wie bei meinen Einstellungen (unter 19 Einzelversuchen 12 mal bei Herrn Dr. Trendelenberg, unter 25 Einzelversuchen 18 mal bei mir). Der mittlere Unterschied aus allen Versuchen zwischen den Einstellungen mit neutralem und rotermüdetem Auge als zahlenmäßiger Ausdruck der beschriebenen Eigentümlichkeit ist übrigens recht klein (für Herrn Dr. Trendelenberg 1,2 %, für mich 2,5 %), fällt also in die Fehlergrenzen. Eine analoge Erscheinung ist bei keiner anderen Gleichung und keiner anderen Umstimmung aufgetreten; bei der Reihe II, 3 hat sie sich nämlich durch die Nachprüfung als rein zufällig erwiesen.

Ich habe noch eine zweite Darstellung des Resultats versucht: Denke ich mir die Einstellungen als Zahlenwerte und bilde mir den Quotienten aus den Mittelwerten der Einstellungen mit umgestimmtem und denen mit neutralem Auge, so ist er gleich 1, wenn die Umstimmung die Gültigkeit der Farbengleichung nicht beeinflußt; wird aber kleiner oder größer als 1, wenn sich durch die Umstimmung die Einstellungen in dem einen oder anderen Sinne ändern. Nun ist die Helligkeit eines Feldes in unserem Apparat direkt proportional der Spaltweite in dem zugehörigen Kollimator, zum Vergleich der Helligkeitseinstellungen können also direkt die abgelesenen Spaltweiten verwandt werden. Es seien 24,1, 23,7, 23,1 drei Mittelwerte eines Versuches (neutral — umgestimmt — neutral), so ist der gesuchte Quotient: $\frac{23{,}7}{(24{,}1 + 23{,}1) : 2} = \frac{23{,}7}{23{,}6} = \mathbf{1{,}004}$.

Der variierte Spalt war stets der des Kollimators II, welcher das homogene Vergleichslicht enthielt. Ist der Quotient größer als 1, so bedeutet das also: Das Vergleichslicht mußte nach der Umstimmung heller eingestellt werden; die Mischung erschien zu hell; darnach besagt ein Quotient, der kleiner ist als 1: Die Mischung erschien nach der Umstimmung zu dunkel.

Der Farbenton, d. h. das Verhältnis der beiden Komponenten einer Farbenmischung, ist in unserem Apparat dem Quadrat der Tangente des Winkels proportional, in dem die Nicolschen Prismen stehen.

Es seien 25,7°, 25,5°, 25,6° die Mittelwerte eines Versuchs. Unser Quotient ist dann: $\frac{\mathrm{tg}^2\ 25{,}5^0}{\mathrm{tg}^2\ 25{,}65^0} = \mathbf{0{,}988}$.

Nach der Umstimmung wurde ein kleinerer Winkel, also ein verhältnismäßig größerer Anteil der langwelligen Komponente eingestellt. Dementsprechend besagt ein Quotient, der kleiner ist als 1, es sei nach der Umstimmung mehr langwelliges, ein Quotient, der größer ist als 1, es sei mehr kurzwelliges Licht zur Herstellung einer Gleichung notwendig gewesen.

Die auf diese Weise berechneten Quotienten enthält die Tabelle 2, die genau in Zahlen wiedergibt, was die Tabelle 1 graphisch darzustellen sucht.

Außer den geschilderten typischen Versuchsreihen, in denen je drei Einstellungen mit umgestimmtem Auge zeitlich beiderseits in solche mit neutralem Auge eingeschlossen sind, und durch die ganze Reihe immer dieselbe Umstimmung untersucht wurde, habe ich früher schon mit Herrn Dr. Trendelenberg zusammen Versuche angestellt, bei denen immer der eine von uns 3 Einstellungen mit neutralem, dann 3 Einstellungen mit rotumgestimmtem Sehorgan machte, worauf der andere sofort denselben Versuch ausführte; unterdessen hatte sich das Auge des ersteren erholt und er konnte sofort einen Versuch mit grünumgestimmtem Auge anstellen, dem natürlich erst wieder 3 Kontrolleinstellungen mit neutralem Auge vorhergeschickt wurden. In derselben Weise folgten dann die Versuche mit Gelb- und Blauumstimmung. Diese Versuche haben den Fehler, daß die Einstellungen mit umgestimmtem Auge nur jeweils mit den ihnen unmittelbar vorhergehenden Einstellungen mit neutralem Auge verglichen werden können. Sie haben aber den großen Vorteil der Kontrolle eines zweiten Beobachters und scheinen mir deshalb sehr wertvoll. Sie führten zu demselben Resultat wie die zuerst beschriebenen Versuche. Ich gebe die nach der oben angeführten Methode ermittelten Quotienten nach dem Schema der Tabellen 1 und 2 geordnet in Tabelle 3 und 4 bei.

Alle Versuche führen uns also zu dem Ergebnis: Dem Persistenzsatz kommt eine strenge Gültigkeit zu. Minimale Abweichungen von ihm, die innerhalb der angegebenen Einstellungsfehler liegen, sind nicht mit Sicherheit auszuschließen, doch dürften die angeführten Ausnahmen rein auf Zufälligkeiten beruhen.

---

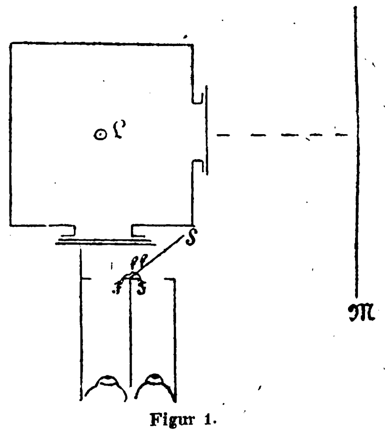
## 2.
## Der Proportionalitätssatz.

Der zweite in der v. Kriesschen Arbeit als gültig vorausgesetzte Satz ist der Proportionalitätssatz: Stelle ich mir zwei Netzhautstellen von verschiedener Stimmung $s_1$ und $s_2$ vor und zwei Farbengleichungen von der Formel $L_1[s_1] = L_2[s_2]$ und $L_3[s_1] = L_4[s_2]$, so besagt der Proportionalitätssatz $(L_1 + L_3)[s_1] = (L_2 + L_4)[s_2]$. In einer etwas anderen Formulierung hat der Satz als «Fechner-Helmholtzscher Satz über negative Nachbilder und seine Analogien» in jüngster Zeit in den ausgedehnten Versuchen von Wilhelm Wirth im Wundtschen Institut eine eingehende Untersuchung erfahren, die ihn in weiten Grenzen als gültig erwies. Gerade im Hinblick auf die Wirthsche Arbeit dürften nun die im folgenden zu beschreibenden Versuche, welche Bedingungen enthalten, unter denen der Proportionalitätssatz nicht gültig ist, von einigem Interesse sein.

Sie sollen die Fragen beantworten: Kann man in der oben gegebenen Formel statt Stimmung auch Adaptation setzen? Bleibt der Proportionalitätssatz auch gültig für Adaptationsänderungen des Auges? Diese Aufgabe konnte nicht mit der gewöhnlichen Methode der monokularen Gleichung gelöst werden, da es ja nicht möglich ist, zwei verschiedene Adaptationen auf zwei verschiedenen Netzhautstellen desselben Auges herzustellen; ich habe daher die Versuche mit einer binokularen Gleichung ausgeführt.

Meine erste Versuchsanordnung war also folgende: Ein schwarzer Blechkasten umschließt allseitig die Lichtquelle L, die in einem Auerbrenner besteht. (Vergl. Figur 1.) Nur die dem Beobachter zugekehrte und die zu seiner Rechten liegende Seitenfläche des Kastens tragen in derselben Höhe zwei gleich-

große runde Ausschnitte, die mit dünnen Milchglasscheiben verschlossen sind und außerdem eine Vorrichtung tragen zum Vorschieben farbiger Gläser. Die vordere Scheibe wurde nun durch die linke Hälfte eines 30 cm langen, mit schwarzem Samt ausgeschlagenen Doppelschachtes hindurch vom linken Auge direkt beobachtet. Dagegen fiel das Licht der seitlichen Scheibe zunächst auf eine verschiebbare Magnesiumoxydfläche (M), die erst mittels des drehbaren Spiegels (S) durch die rechte Hälfte des Doppelschachtes hindurch vom rechten Auge beobachtet wurde. Ein schwarzes Diaphragma am entfernteren Ende des Doppelschachtes spart zwei gleichgroße viereckige Felder aus, die also im Gesichtsfeld nebeneinander liegen, nur getrennt durch den schmalen Streifen f. Sie konnten zur Berührung gebracht werden, indem man den beiden Augen zwei verschiedene symmetrisch an der inneren Seite der Felder gelegene Fixationspunkte bot. Diese Fixation war nicht ganz leicht und erforderte einige Übung. Als Fixationsmarken dienten zwei kleine Platinschlingen, die durch elektrische Ströme in passender Stärke zum Glühen gebracht wurden. Sie waren an den oberen inneren Ecken der beiden Felder angebracht. In den späteren Versuchen konnte ich auch ohne die Glühlämpchen gut fixieren und ließ sie deshalb weg.



Figur 1.

Von Wichtigkeit ist die Größe der Felder. Die scheinbare Größe der horizontalen Seite des einzelnen Feldes beträgt 6° 58′, die der vertikalen 9° 3′, also die der diagonalen 11° 19′. Bei Fixation der oberen inneren Ecke wurde also der weitaus größte Teil außerhalb des stäbchenfreien Bezirks der Netzhaut abgebildet.

Von den beiden Feldern war nun die Helligkeit des linken konstant, während die des rechten variiert werden

konnte. Der Magnesiumoxydschirm konnte nämlich auf einer horizontalen zu der seitlichen Platte senkrecht stehenden Schiene der Lichtquelle genähert und von ihr entfernt und damit das rechte Feld heller und dunkler eingestellt werden.

Bei passender relativer Helligkeit der beiden Felder konnte ich also durch Einstellen des Schirmes eine Gleichung herstellen, und zwar zunächst bei größter Intensität der Beleuchtung. Um nun Gleichungen bei geringerer Helligkeit zu erhalten, mußte die Helligkeit beider Felder proportional verringert werden können. Das habe ich in verschiedener Weise durchgeführt. Zunächst versuchte ich die Lichtquelle abzuschwächen: Komprimierte ich den Gasschlauch, welcher den Auerbrenner versah, so leuchtete der Glühstrumpf nicht mehr vollständig und die beiden Felder wurden dunkler. Diese Methode hatte jedoch verschiedene Mängel: einmal änderte sich das Licht nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ, es wurde nämlich rötlicher; und dann konnte man auch nicht ohne weiteres annehmen, daß die Helligkeit beider Felder in demselben Maße abgeschwächt wurde, da ja den beiden beleuchteten Scheiben verschiedene Seiten des Glühstrumpfes gegenüber lagen, die sich bei der Verdunkelung in verschiedener Weise ändern konnten. Einwandfreier war vielleicht folgende Methode: Ich ersetzte den Auerbrenner durch einen Argandbrenner und brachte ins Zentrum des Brenners eine kleine Stichflamme, die durch einen besonderen Schlauch an die Gasleitung angeschlossen wurde. Durch einen Hebeldruck konnte nun die Gaszufuhr zu dem Argandbrenner abgestellt und somit die große Flamme gelöscht werden, so daß nur die kleine Stichflamme brennen blieb; wurde die Zuleitung wieder hergestellt, so entzündete sich das Gas des Rundbrenners wieder an der kleinen zentralen Flamme. Die Qualität des Lichtes änderte sich bei diesem Verfahren nicht, auch konnte eine gleichmäßige Herabsetzung der Helligkeit auf beiden Seiten mit großer Wahrscheinlichkeit angenommen werden. Dafür aber hatte der Argandbrenner den Nachteil, daß er im Vergleich zu dem Auerbrenner ein viel schwächeres und für meine Versuche, die eine möglichst große Variierung der Helligkeit verlangten, zu

schwaches Licht lieferte. Da sich aber der ganze Wert des Resultats meiner Versuche gerade auf eine möglichst große und möglichst gleichmäßige Änderung stützte, so entschloß ich mich schließlich zu folgender Anordnung: Ich ließ die Lichtquelle konstant und schob zwischen sie und die beiden beleuchteten Scheiben zwei undurchsichtige Blechschirme vor mit zwei gleichgroßen runden Öffnungen, durch welche nur ein geringer Teil, und zwar auf beiden Seiten gleichviel des gesamten Lichtes fiel.

Hier ist noch ein Wort über die Art der Gleichungen anzufügen. Ich wollte eine Weißgleichung haben. Nun ist das Gaslicht ja immer etwas gelblich und daher die direkt beleuchtete Scheibe auch. Dagegen erschien die Magnesiumoxydfläche eher etwas bläulich. Zum Ausgleich dieser Farbenunterschiede brachte ich hinter der linken Scheibe ein schwach blaues Glas an. So hatte ich mit leidlicher Genauigkeit eine farblose Gleichung. Um den geringen Farbenton, der jetzt noch blieb, noch weiter zu beseitigen, etwa durch Durchschicken des Lichtes durch eine genau abstufbare Kupfersulfatlösung oder ähnliche Lösungen, dazu reichte die Stärke meiner Lichtquelle nicht aus; auch lag keine zwingende Indikation dafür vor, denn der minimale Farbenton störte den Vergleich der Felder nicht, auch dürfte er das Resultat der Versuche in keiner nennenswerten Weise beeinflußt haben.

Das war der äußere Apparat. Nun galt es, die beiden Augen in einen verschiedenen Adaptationszustand zu versetzen. Und zwar war es durch den Apparat schon vorgeschrieben, daß das rechte Auge das empfindlichere, also dunkel adaptierte, sein mußte, da die indirekte Beleuchtung des rechten Feldes viel schwächer war, als die direkte des linken. Ich adaptierte also das rechte Auge 40 Minuten an Dunkel, oder, was praktischer war, ich adaptierte zunächst beide Augen an Dunkel, indem ich mich 40 Minuten lang im Dunkelzimmer aufhielt, verband dann das rechte Auge und setzte das linke 10 Minuten dem Tageslicht aus, adaptierte es also wieder an Hell. Mit den in dieser Weise vorbereiteten Augen mußten nun Gleichungen eingestellt werden bei großer und geringer Beleuchtungsintensität,



die dann miteinander verglichen werden konnten. Die einfachste Art, die Gleichungen zu finden, wäre nun die gewesen, daß man beide Felder richtig fixiert und dann den beweglichen Schirm so lange verschoben hätte, bis beide Felder gleichhell erschienen wären. Doch stand dem Verfahren folgendes Bedenken entgegen: Die Helligkeitsempfindung des mit dunkel adaptiertem Auge gesehenen Feldes nahm bei Fixation sehr schnell ab (bei großer Beleuchtungsintensität); es durfte also immer nur der Eindruck des ersten Momentes verwertet werden, und deshalb war es kaum möglich, mit einem einzigen Versuch eine richtige Gleichung herzustellen. Ich wählte daher einen Umweg. Das rechte variable Feld wurde immer auf eine bestimmte Helligkeit eingestellt und dann suchte ich in einem einzelnen Versuch nur zu ermitteln, ob es heller oder dunkler erschien als das linke konstante Feld. Durch verschiedene Einstellungen konnte so in einer ganzen Versuchsreihe die richtige Gleichung gefunden werden.

Im einzelnen verliefen also die Versuche folgendermaßen: Beide Augen wurden vor das verdunkelte Gesichtsfeld gebracht, dann momentan ad maximum erhellt und der erste Eindruck beurteilt. Nachdem dann das linke Auge bei verdecktem rechten 40 Sekunden dem Tageslicht ausgesetzt war, folgte ein zweiter und in derselben Weise ein dritter Versuch. Jede Einstellung wurde also dreimal geprüft. Mit fünf Einstellungen hatte ich dann eine Gleichung genau hergestellt. In ganz analoger Weise fand ich die Gleichung bei geringster Beleuchtungsintensität. 13 Reihen habe ich in der beschriebenen Anordnung durchgeführt. Ihr Ergebnis ist folgendes: Die Entfernung der beweglichen reflektierenden Magnesiumoxydfläche von der Lichtquelle betrug:

I.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1. | Bei großer Beleuchtungsintensität | | 31 | cm |
| 2. | » kleiner | » | 96 | » |
| 3. | » großer | » | 42 | » |
| 4. | » kleiner | » | 122 | » |

Die Reihen folgen sich zeitlich in der angegebenen Reihenfolge.

II.

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1. Große | Intensität | 31 | cm |
| 2. Kleine | » | 95 | » |
| 3. Große | » | 35 | » |
| 4. Kleine | » | 110 | » |

III.

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1. Große | Intensität | 40 | cm |
| 2. Kleine | » | 120 | » |
| 3. Große | » | 40 | » |

IV.

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1. Große | Intensität | 50 | cm |
| 2. Kleine | « | 140 | » |

Man sieht sofort, der Proportionalitätssatz ist hier nicht gültig, denn nach ihm müßte, wenn $[L_1]a_1 = [L_2]a_2$, auch $[n \cdot L_1]a_i = [n \cdot L_2]a_2$ sein (wobei mit L die Lichter, mit a die Adaptationszustände bezeichnet sein sollen).

Wenn nun die Versuche einwandfrei sein sollten, mußte noch festgestellt werden, daß $a_1$ und $a_2$ (die Stimmungen) in den Reihen, die miteinander verglichen wurden, sich gleich blieben und ferner, daß das n auf beiden Seiten der Gleichung dieselbe Zahl bedeutet. Das erstere erscheint mir hinlänglich garantiert durch die stets gleichmäßige Vorbereitung der Augen; es dürfte auch aus der Konstanz der Ergebnisse in den fortlaufenden Reihen hervorgehen.

Das zweite habe ich auf folgende Weise festgestellt: Ich stellte eine Gleichung mit beiderseits gleichgestimmten Augen bei großer und kleiner Beleuchtungsintensität her und fand:

I. Bei helladaptierten Augen Gleichung bei

| Großer Intensität | Kleiner Intensität |
|---|---|
| 11 cm | 11 cm |

II. Bei dunkeladaptierten Augen Gleichung bei

| Großer Intensität | Kleiner Intensität |
|---|---|
| 11 cm | 11 cm. |

(Natürlich mußte zu diesen Versuchen die Helligkeit des direkt beleuchteten linken Feldes durch eine zweite Milchglasscheibe abgeschwächt werden).

Nach diesen Versuchen erweist sich also das dunkeladaptierte Auge für die geringe Beleuchtungsintensität relativ empfindlicher als für große; um wieviel, läßt sich aus dem Apparat nicht leicht berechnen[1]) und photometrische Versuche wurden für diese Versuchseinrichtung nicht angestellt.

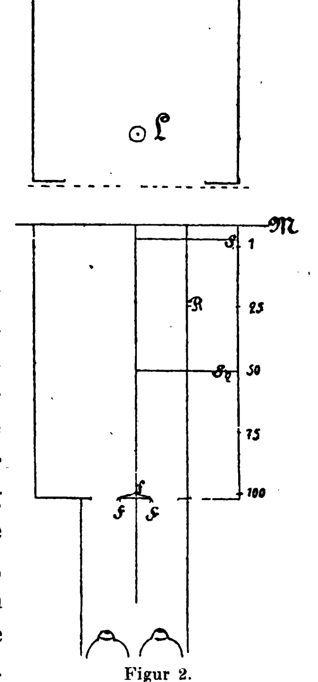
Man konnte nach diesem Resultate versucht sein, den gefundenen Quotienten (ca. 1 : 3 in unbekanntem Maßstab), der die relativ größere Empfindlichkeit des dunkeladaptierten Auges für kleine Helligkeiten ausdrückt, als Funktion der Adaptationsdifferenz der beiden Augen und der Intensitätsdifferenz der beiden Beleuchtungen aufzufassen und diese Funktion durch getrennte Untersuchung ihrer beiden Variabeln näher zu charakterisieren; jedoch stand der zu erwartende Erfolg mit den Schwierigkeiten einer solchen Untersuchung in keinem einladenden Verhältnis und deshalb wurde dieser Plan nicht durchgeführt.

Dagegen war es angebracht, das gefundene Resultat durch weitere Untersuchungen zu sichern und insbesondere als unabhängig von der speziellen Versuchsanordnung darzustellen. Daher entschloß ich mich zu neuen Versuchen mit dem abgeänderten Apparat, der in Figur 2 skizziert ist.

L stellt wieder die Lichtquelle in dem allseitig abschließenden Kasten dar, der jetzt nur an der dem Beobachter zugekehrten Seite eine große viereckige Öffnung zeigt. M ist eine Milchglasscheibe, die von L direkt und annähernd gleichmäßig beleuchtet wird. Sie schließt einen 1 m langen, durch eine senkrechte Scheidewand in der Längsrichtung in zwei Teile geteilten schwarzen Kasten nach der Seite der Lichtquelle hin vollständig ab. Die entgegengesetzte, dem Beobachter zugekehrte Seite des Kastens ist durch schwarzen Karton abgeschlossen,

[1]) Daß die Helligkeit des Magnesiumoxydschirmes dem Quadrat seiner Entfernung von der Lichtquelle (in diesem Falle der beleuchteten Milchglasscheibe) umgekehrt proportional sei, läßt sich ja leicht übersehen; aber das Licht dieses Schirmes fiel ja nicht direkt ins Auge, sondern wurde erst gespiegelt, und zwar je nach der Entfernung des Schirmes in verschiedenem Winkel, so daß eine Berechnung der resultierenden Helligkeit recht kompliziert sein dürfte.

der zwei viereckige Ausschnitte trägt, die an Größe genau den Feldern der oben beschriebenen Versuche entsprechen. Zwischen ihnen und den Augen befindet sich wieder der schon bekannte Doppelschacht mit den analogen Fixationspunkten. $S_1$ stellt eine Milchglasscheibe dar, die nur die rechte Hälfte des Kastens abschließt und den Zweck hat, die Helligkeit des rechten Feldes um einen bestimmten Betrag herabzusetzen. Ihre Enlfernung von M wurde durch Ausprobieren auf das richtige Maß festgesetzt und dann nicht mehr geändert. $S_2$ ist eine dritte auf der Schiene R bewegliche Milchglasscheibe; sie verdunkelt das rechte Gesichtsfeld noch mehr, und zwar ist, wie die unten beschriebene photometrische Untersuchung ergeben hat, die durch sie bewirkte Abschwächung ungefähr direkt proportional ihrer Entfernung von $S_1$. Die Bewegung der Scheibe $S_2$ erfolgt durch einen Schnurlauf, der handlich am Beobachtungstisch angebracht ist und gleichzeitig die Stellung der Scheibe erkennen läßt.



Figur 2.

So hatte ich also zwei Felder, die von derselben Lichtquelle direkt beleuchtet waren. Durch Einstellen der Scheibe $S_2$ konnte bequem eine Gleichung hergestellt werden. Bei der Größe der Felder, die auf einem so großen und ungleichartigen Netzhautbezirke abgebildet wurden, konnte die Gleichung natürlich nicht den Anspruch auf absolute Genauigkeit erheben, sondern mußte mehr oder minder den Charakter einer Kompromißgleichung tragen. Die Abschwächung der Helligkeit beider Felder erfolgte nun dadurch, daß ich einen Blechschirm zwischen L und S einschob, der genau in der Mitte (also durch die Scheidewand des Kastens gerade senkrecht halbiert) eine kleine runde Öffnung trug. Seine Entfernung von L war so gewählt,

daß durch die Öffnung hindurch noch die ganze Scheibe S beleuchtet wurde. Damit hatte ich wieder die Möglichkeit, eine Gleichung bei großer und eine Gleichung bei kleiner Beleuchtungsintensität herzustellen.

Auch die Versuchsanordnung änderte ich etwas ab. Für eine Stellung der Scheibe $S_2$ beurteilte ich jetzt die relative Helligkeit der Felder direkt nacheinander bei:

1. Kleiner Beleuchtungsintensität,
2. Großer »
3. Kleiner »
4. Großer »
5. Kleiner »

Darauf adaptierte ich das linke Auge 40 Sekunden hell, das rechte dunkel, und stellte einen neuen Versuch an.

Je 5 solcher Versuche wurden für eine einzelne Einstellung ausgeführt; 5 Einstellungen ergaben zusammen eine Versuchsreihe. Durch den Vergleich aller Urteile über die Dunkelgleichungen einer Versuchsreihe konnte dann die Lage der Gleichung bei kleiner und analog die bei großer Beleuchtungsintensität gefunden werden.

Im ganzen habe ich 7 Versuchsreihen durchgeführt. Ihr Ergebnis war folgendes:

| | Stellung der Scheibe $S_2$ zur Gleichheit bei | |
|---|---|---|
| | Kleiner | Großer |
| | Beleuchtungsintensität | |
| I. | 85—90 cm | 10—15 cm |
| II. | 85—90 » | 35—40 » |
| III. | 85—90 » | 60—65 » |
| IV. | 85—90 » | 35—40 » |
| V. | 85—90 » | 35—40 » |
| VI. | 85—90 » | 35—40 » |
| VII. | 85—90 » | 35—40 » |

Die Ausdrucksweise 85—90 cm, 35—40 cm liegt in der Natur der Versuchsanordnung und gibt gleichzeitig die Fehlergrenzen an. Die Ergebnisse der Reihen I und III weichen in entgegengesetzter Richtung von den der übrigen Reihen ohne

erkennbaren Grund ab. Das allgemeine Resultat wird dadurch nicht erschüttert.

Der ständige Wechsel zwischen kleiner und großer Beleuchtungsintensität in der Anordnung sollte von vornherein den Einwand widerlegen, das rechte dunkeladaptierte Auge verliere bei großer Beleuchtungsintensität schnell einen Teil seiner Adaptation und sei deshalb relativ unempfindlicher.

Zur Erhöhung der Sicherheit wurde nach jeder Versuchsreihe zunächst die gefundene Dunkelgleichung (f. v. v.!) eingestellt und abwechselnd bei kleiner und großer Beleuchtungsintensität beobachtet; da konnte man immer wieder sehen, wie das rechte Feld bei kleiner Beleuchtungsintensität gleich, bei großer dunkler erschien als das linke. Wurde dann die Hellgleichung eingestellt, dann war es entsprechend zu hell und gleich. Am auffallendsten war die Erscheinung bei einer mittleren Einstellung, bei der das rechte Feld immer wieder bei kleiner Beleuchtungsintensität zu hell, bei großer zu dunkel erschien. Diese Tatsache hat mir auch Herr Dr. Trendelenberg, der die Güte hatte, mir einige Kontrollversuche anzustellen, verschiedene Male bestätigt. Auch Herr Dr. Kingsbury, der den Zweck der Versuche nicht kannte, hat die Erscheinung bei einem Probeversuch sofort gesehen.

Kontrollversuche mit beiderseits gleichgestimmten Augen, die ganz analog den oben beschriebenen ausgeführt wurden, bestätigten auch für diese Anordnung die Annahme einer ganz proportionalen Abschwächung der Helligkeit beider Seiten durch Vorschieben des Blechschirmes.

Um das Resultat der Versuche nun in einer verwertbaren Form angeben zu können, mußte die relative Intensität der zur Verwendung kommenden Lichter photometrisch bestimmt werden.

Das Ergebnis war folgendes: Setzt ich die Intensität des schwächsten Lichtes, d. i. des Lichtes der rechten Seite der Gleichung bei kleiner Beleuchtungsintensität gleich 1, so ist das ihm gleich erscheinende auf das helladaptierte Auge wirkende Licht der linken Seite = 26.

Die rechte Seite der Hellgleichung ist 218, die linke 1009.

In der Dunkelgleichung verhalten sich also die beiden Seiten wie **1 : 26**, in der Hellgleichung wie 218 : 1009 = **1 : 4,6**.

Also wird durch die Dunkeladaptation die Empfindlichkeit des Auges für das stärkere Licht auf das 4,6fache, für das schwächere aber auf das 26fache, also 5,7mal höher gesteigert.

Anders ausgedrückt: Wenn es sich um schwaches Licht handelt, ist das dunkeladaptierte Auge dem helladaptierten 5,7mal mehr überlegen, als wenn es sich um starkes Licht handelt.

Um über die absoluten Intensitäten der verwendeten Lichter der Vorstellung einen Anhaltspunkt zu geben, sei mitgeteilt, daß die Helligkeiten der Gleichung bei kleiner Beleuchtungsintensität für beide Augen nicht sehr viel über den Schwellenwerten lagen. Die Helligkeiten bei großer Beleuchtungsintensität betrugen das 49- resp. 218fache, sind also auch noch recht gering. Die Anwendung stärkerer Lichter hatte einerseits technische Schwierigkeiten und hätte andererseits wohl auch nicht zu einwandfreien Resultaten geführt, da die Dunkeladaptation durch sie zu schnell aufgehoben worden wäre.

Was kann man nun theoretisch aus den vorliegenden Versuchen schließen?

1. Jedenfalls steht ihr Resultat mit der einfachsten Annahme, die man zur Erklärung der Dunkeladaptation machen könnte, nämlich der, sie bestehe einfach in einer gesteigerten Empfindlichkeit eines und desselben Apparates für Helligkeit, etwa in einer gesteigerten Disposition zu dem D-Prozeß in der Schwarz-Weißsubstanz im Heringschen Sinne, im Widerspruch. Denn aus dieser Annahme folgt unmittelbar die Gültigkeit des Proportionalitätssatzes.

2. Dagegen wird die gefundene Tatsache sehr gut erklärt mit der Annahme, das Sehen bei Hell- und Dunkeladaptation werde durch zwei verschiedene Funktionsweisen des Sehorgans vermittelt. Stelle ich mich auf den Standpunkt der Stäbchentheorie, so kann ich ohne weiteres sagen: Der Proportionalitätssatz wird so lange gültig sein, als nur der eine der beiden Apparate allein oder beide zusammen in demselben Verhältnis das Sehen vermitteln; er wird aber wahrscheinlich ungültig

werden, sobald dieses Verhältnis, also der Adaptationszustand, sich ändert. Denn die Annahme, die Empfindungsintensität sei für beide Apparate dieselbe Funktion der Reizintensität, ist nicht die einfachste der möglichen Annahmen, erscheint also von vornherein als unwahrscheinlich.

Die Tatsachen bestätigen diese Überlegung. Und so dürften vielleicht auch diese Versuche in die Reihe der die Stäbchentheorie begründenden Tatsachen aufgenommen werden.

---

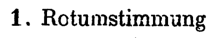
Zum Schlusse sei mir gestattet, meinem hochverehrten Lehrer Herrn Geheimrat v. Kries für die Anregung zu vorstehender Arbeit und die wohlwollende Unterstützung bei Ausführung derselben, Herrn Dr. W. Trendelenberg für freundliche Ratschläge und wertvolle Hilfe meinen verbindlichsten Dank auszusprechen.

---

Tafel 2.

| | I. Gelbgleichung | | II. Blaugrüngleichung | | III. Weißgleichung | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Farbenton | Helligkeit | Farbenton | Helligkeit | Farbenton | Helligkeit |
| 1. Rotumstimmung | 0,959 | 1,004 | 0,983 | 0,976 | 1,053 | 1,000 |
| | 0,946 | 1,004 | 1,009 | 1,031 | 0,940 | 0,993 |
| | 0,975 | 0,993 | 0,964 | 0,999 | 1,062 | 1,004 |
| | 0,987 | 0,033 | 0,945 | 1,057 | 1,000 | 0,985 |
| | 0,993 | 1,032 | 0,991 | 0,988 | 0,976 | 0,985 |
| 2. Grünumstimmung | 1,108 | 1,004 | 0,973 | 1,011 | 1,000 | 0,991 |
| | 1,061 | 1,033 | 0,991 | 0,995 | 0,969 | 1,007 |
| | 0,941 | 0,959 | 0,974 | 0,917 | 0,969 | 1,000 |
| | 0,915 | 1,043 | 1,018 | 0,960 | 1,000 | 1,015 |
| | 1,000 | 1,022 | 0,811 | 1,000 | 0,940 | 0,993 |
| | — | — | 0.896 | — | — | — |
| 3. Gelbumstimmung | 0,954 | 0,966 | 0,925 | 1,000 | 1,000 | 1,019 |
| | 1,000 | 0,926 | 0,990 | 0,995 | 0,971 | 0,993 |
| | 0,975 | 1,000 | 0,990 | 1,000 | 0,985 | 0,985 |
| | 0,948 | 1,018 | 0,939 | 0,999 | 0,985 | 1,000 |
| | 1,000 | — | 0,862 | 1,001 | 1,026 | 0,993 |
| | — | — | — | 0,998 | — | — |
| | — | — | — | 1,002 | — | — |
| 4. Blauumstimmung | 1,039 | 0,996 | 1,066 | 0,997 | 1,031 | 1,022 |
| | 1,000 | 0,997 | 0,930 | 0,956 | 0,987 | 1,044 |
| | 1,007 | 0,968 | 1,009 | 1,100 | 1,015 | 0,991 |
| | 1,031 | 1,044 | 0,883 | 1,015 | 1,015 | 0,996 |
| | 0,981 | 1,005 | 0,979 | — | 1,031 | 1,011 |
| | — | 1,035 | — | — | — | — |

## II. Weißgleichung.



1. Rotumstimmung

a) Farbenton

b) Helligkeit

2. Grünumstimmung

a) Farbenton

b) Helligkeit

3. Gelbumstimmung

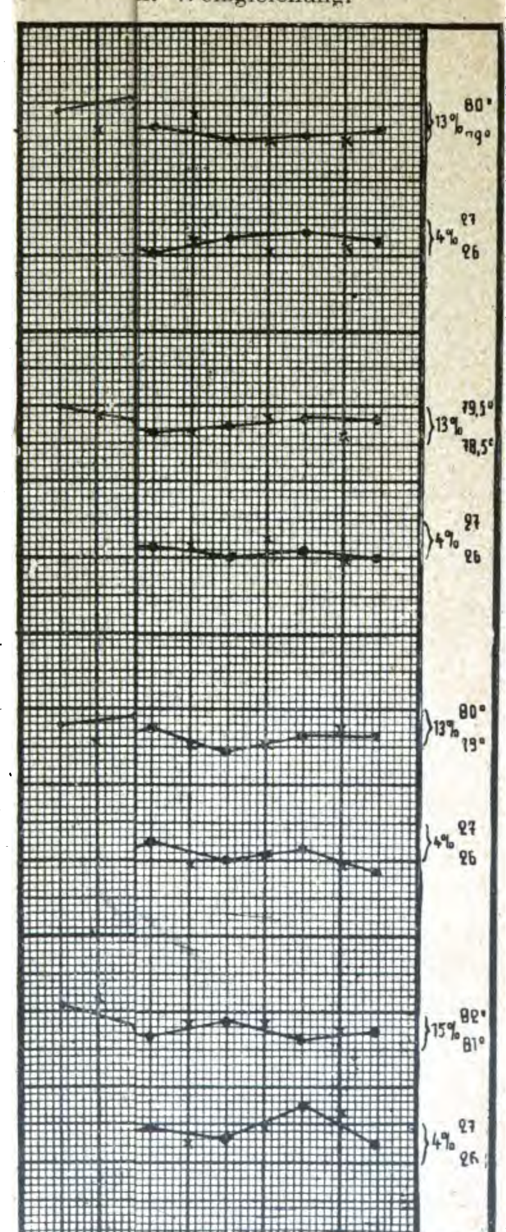
a) Farbenton

b) Helligkeit

4. Blauumstimmung

a) Farbenton

b) Helligkeit



Tafel 3 (Dr. Trendelenberg).

| | I. Gelbgleichung | | II. Blaugrüngleichung | | III. Weißgleichung | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Farbenton | Helligkeit | Farbenton | Helligkeit | Farbenton | Helligkeit |
| 1. Rotumstimmung | 0,993 | 0,857 | 1,069 | 1,030 | 1,15 | 1,000 |
| | 1,050 | 0,780 | 1,043 | 1,098 | — | — |
| | 0,922 | 1,148 | — | — | — | — |
| | 0,950 | 1,021 | — | — | — | — |
| | 0,985 | 0,910 | — | — | — | — |
| | — | 0,961 | — | — | — | — |
| 2. Grünumstimmung | 1,056 | 1,073 | 0,820 | 0,995 | 0,938 | 0,981 |
| | 1,007 | 0,928 | 1,090 | 0,918 | 1,000 | — |
| | 0,967 | 1,066 | — | — | — | — |
| | 0,993 | 1,100 | — | — | — | — |
| | 1,060 | 1,007 | — | — | — | — |
| | — | 1,012 | — | — | — | — |
| 3. Gelbumstimmung | 0,945 | 1,017 | 0,961 | 1,012 | 1,019 | 0,988 |
| | 1,021 | 1,053 | 1,000 | 0,866 | — | — |
| | 0,867 | 1,005 | — | — | — | — |
| | 0,978 | 1,034 | — | — | — | — |
| | 0,993 | 0,945 | — | — | — | — |
| | — | 0,974 | — | — | — | — |
| 4. Blauumstimmung | 1,000 | 1,025 | 1,036 | 0,946 | 1,048 | 0,987 |
| | 1,071 | 1,030 | 1,043 | 1,014 | — | — |
| | 0,953 | 1,096 | — | — | — | — |
| | 1,013 | 1,117 | — | — | — | — |
| | 0,993 | 0,966 | — | — | — | — |
| | — | 0,982 | — | — | — | — |

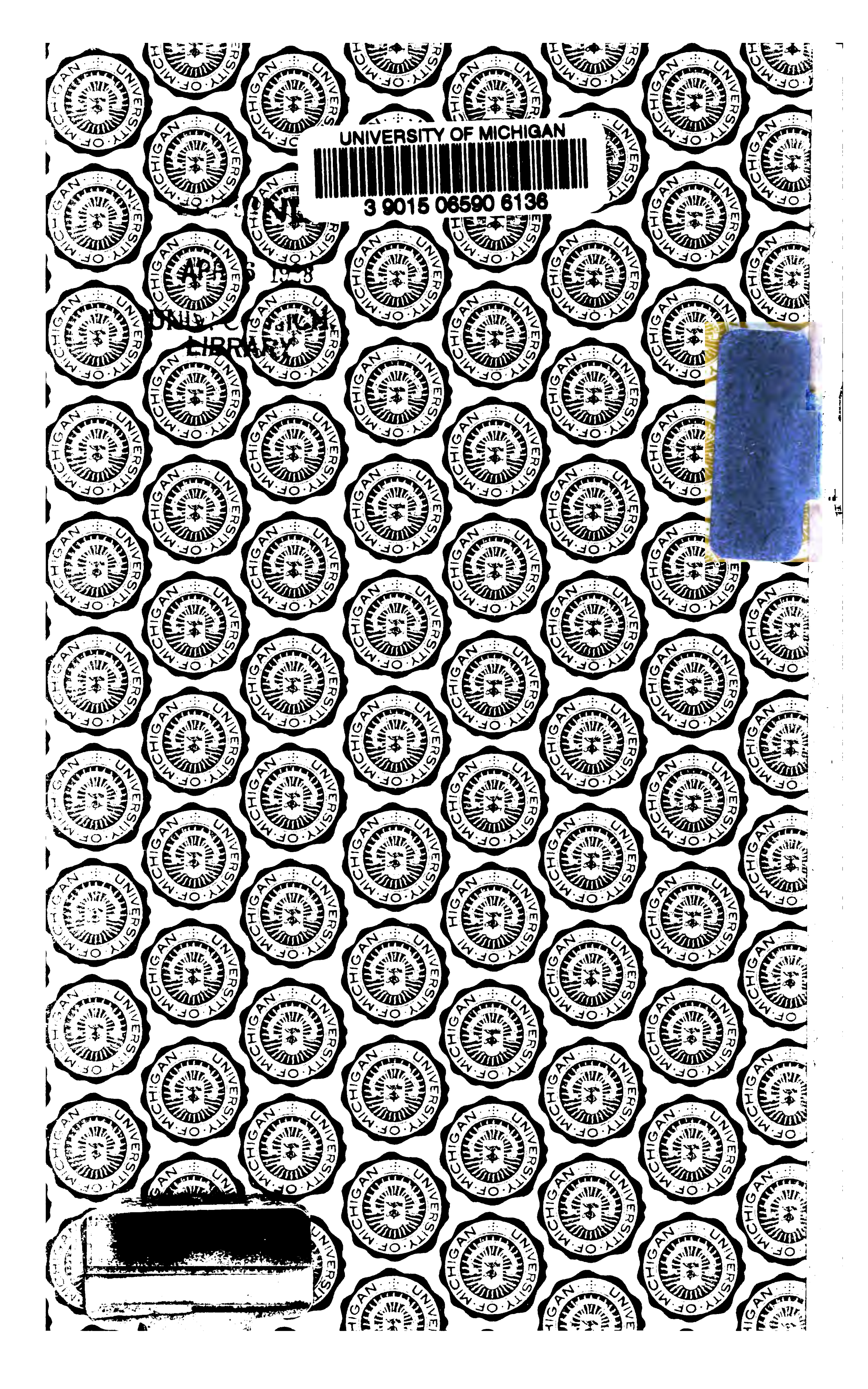
Tafel 4 (Bühler).

| | I. Gelbgleichung | | II. Blaugrüngleichung | | III. Weißgleichung | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Farbenton | Helligkeit | Farbenton | Helligkeit | Farbenton | Helligkeit |
| 1. Rotumstimmung | 1,000 | 1,018 | 0,992 | 0,900 | 0,949 | 1,000 |
| | 0,891 | 0,911 | 0,916 | 1,030 | 1,140 | — |
| | 0,951 | 1,000 | 1,109 | 0,976 | 0,941 | — |
| | 0,910 | 1,150 | — | — | — | — |
| | 0,978 | 0,904 | — | — | — | — |
| | — | 0,999 | — | — | — | — |
| 2. Grünumstimmuug | 0,978 | 0,801 | 0,132 | 0,950 | 0,922 | 1,069 |
| | 1,087 | 0,918 | 0,975 | 0,956 | 0,860 | — |
| | 0,983 | 0,869 | 1,009 | 0,925 | 0,982 | — |
| | 0,901 | 1,002 | — | — | 1,000 | — |
| | 1,086 | 0,872 | — | — | — | — |
| | — | 1,045 | — | — | — | — |
| 3. Gelbumstimmung | 1,022 | 0,847 | 0,944 | 1,010 | 1,009 | 0,980 |
| | 0,957 | 0,786 | 0,844 | 0,972 | 0,985 | — |
| | 1,116 | 0,972 | 1,029 | 0,973 | 0,921 | — |
| | 0,984 | 0,922 | — | — | — | — |
| | 0,940 | 1,147 | — | — | — | — |
| | — | 1,019 | — | — | — | — |
| 4. Blauumstimmung | 1,000 | 1,043 | 0,890 | 0,997 | 0,985 | 1,015 |
| | 0,972 | 0,977 | 0,992 | 1,065 | 0,933 | — |
| | 1,000 | 0,988 | 0,980 | 1,018 | 0,991 | — |
| | 0,914 | 1,092 | — | — | — | — |
| | 1,030 | 0,979 | — | — | — | — |
| | — | 0,910 | — | — | — | — |

# Curriculum vitae.

Karl Bühler, Sohn des Bahnarbeiters Ludwig Bühler und seiner Frau Bertha, geb. Emmerich, wurde am 27. Mai 1879 in Meckesheim (Baden) geboren. Er besuchte die Volksschule zu Meckesheim und das Gymnasium zu Tauberbischofsheim, an dem er im Juli 1898 die Reifeprüfung bestand. Darauf widmete er sich dem Studium der Medizin an der Universität zu Freiburg i. Br., wo er im Sommersemester 1900 die ärztliche Vorprüfung, im Sommersemester 1903 die ärztliche Prüfung bestand.




UNIVERSITY OF MICHIGAN
3 9015 06590 6136